

アトラクタに基づく行動制御とABC学習による 自律ロボットの自己分析

マンフレッド・ヒルド、マサイアス・クビッシュ
ベルリン・フンボルト大学、ニューロボティクス研究所、ドイツ

概要: 感覚運動ループを備え、特殊環境に置かれた自律ロボットは、1つの力学系と見なされる。アトラクタに基づく行動制御(ABC)によって、この力学系のアトラクタはエネルギー効率の良い行動体位に対応し、アトラクタと連結したヘテロクリニック軌道は安定した動作軌道の生成に役立つ。我々はABC学習を紹介し、それがどのように自律ロボットがモデルなしでゼロから行動機能の自己分析をすることを可能にするのか実例説明していく。

キーワード: 発達ロボティクス、自己分析、感覚制御

1. 導入

自分の身体の動きや、その発達後期においては環境の特殊性を分析するようになる幼児は、いつでも非常に興味を引く観察対象だ。学習基盤の研究が過去数十年間に目覚ましい進歩を遂げたにもかかわらず、前述のような状況は自律ロボットの研究領域においてはほとんど見られなかった。本紙で我々は、非線形力学論に基づいて、この課題に取り組むために役立つ枠組みを提案する。よく知られたパターンは [1] であるが、[2] の知覚制御理論の視点、また、[3] のアシュビーの手法を考慮した適応システムの現代モデルも取り入れる。これは直ちに感覚運動の多様性の研究に通じるものである。最も単純な系においてのみ、それらは分析的に詳述されるのである。実ロボットの感覚運動の多様性の大部分は数値的に抽出される必要がある [4]。

ロボットがその行動多様性を能動的に自己分析しているとするならば、発見的、あるいは動機付けシステムのようなものが必要である。それには、多くの異なった手法が提案されてきた。例えば、分岐の近くで作動する感覚運動ループを用いる [5]、内的自発性を用いる [6]、自己組織化マップの拡張を用いる [7] といったものだ。すべてのこうした機構は、実際に行動記憶である、多様性を表現する構造を生み出している。これらは急速に成長したため、より抽象的で圧縮された表現に変わらざるをえなかった。有望なアプローチ方法には、例えば、二次曲面に基づくもの [8]、あるいは多様性の後退ではより一般的な、リー群論を用いるもの [9] がある。間違いなく、ブラインド・データ圧縮は自律学習を行き詰まらせる一意味情報は一斉に抽出され、感覚運動ループはこの処理の間、変動する環境的前後関係のもとでさえ、継続して適合されなければならないのだ [10]。

自律ロボットの制御に関して、生物学的に着想を得たアプローチは「自然な」行動を達成することにおいて最も魅力的だろう [11]。それは滑らかな動的挙動も保証しなければならず、従って、作動装置の非線形性の適応補償に対処しなければならない。一部の結果はバックラッシュ補償 [12] や摩擦補償 [13] に出ているが、「系全体」の枠組みに完全に統合された、自己分析のためのアプローチはまだ調査中である。最近の結果 [14] が用いられるかもしれないが、現存する理論的発見 [15] も実ロボットに導入されて試験されるかもしれない。本紙で提示される枠組みは、動作制御 [16]、神経力学系 [17]、そして適応システム [18] の分野における既存の研究に基づくものである。我々は動的行動の改善 [19]、感覚運動の多様性の抽出 [20]、そして自己および環境分析のための経験則の利用 [21] に取り組んだ現在の結果を提示する。

本紙の残りは、以下のように構成されている。我々はまず力学系を定義し、一般的な用語を最小限の抽象的な例を用いて要約する。それから、有望な新しい感覚運動制御のパラダイム、いわゆるアトラクタに基づく行動制御(ABC)を紹介する。これは強固な行動連鎖を生み出すことを可能にするものである。ここでは実ロボットの足を使って行われた実験の結果に基づいて説明する。その後、我々は行動多様性を系統的に抽出できるABC学習と呼ばれる発見的手法について紹介していく。再び実ロボットの例を使用する。最後に、我々は発表された新たな枠組みの意味合いについて考察し、研究の将来展望を述べる。

2. 力学系としての自律ロボット

力学系 S は、時間 t における状態 $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ の展開を説明する。一般的にその状態は n 次元空間のある地点におけるものであり、 S のなりえるすべての状態は多様性 $M \subset \mathbb{R}^n$ で、位相空間と呼ばれるものである。物理系が考慮される場合には時間は連続的であるが、我々はサンプル化された感覚運動値を用いるロボットを扱うため、離散時間系、すなわち $t \in \mathbb{N}$ に限定する。

2.1 理論上の例

2つの完全に反復接続されるニューロンの最小限の系を考えると、以下のように定義される。

$$\mathbf{x}(t+1) = F(\mathbf{x}(t)), F(\mathbf{x}) = \tanh(\mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{b}_p) \quad (1)$$

t とは離散時間ステップで、 \mathbf{x} は両ニューロンのアウトプット、すなわち系状態

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 1.06 & 0.02 \\ -0.01 & 1.05 \end{pmatrix} \quad (2)$$

はウェイト行列であり、

$$b_p = \begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

パラメータ化されたバイアス項である。双曲線正接の領域が(-1,+1)であるため、図1 (パラメータ値 $p=-0.01$ 、 $p=0$) のように2次元正方形の中に位相空間を描くことが可能である。力学系を分析するとき、 $x(t)$ の $t \rightarrow \infty$ における長期挙動も興味深い。時間 $t=0$ における固有状態 $x(0)=x_0$ から始めると、過渡状態は時間の経過とともになくなり、系は最終的に位相空間 $A \subset M$ の不変部分集合 F に落ち着く。すなわち、 $F(A)=A$ である。

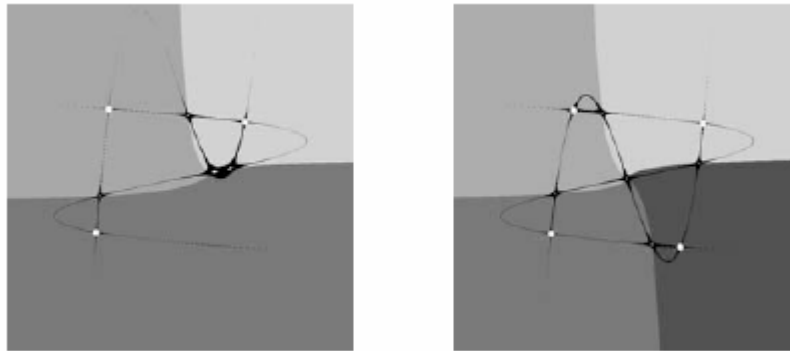


図1 パラメータ化された位相空間、Eq.(1)は完全な回帰神経回路網。左図は $p=-0.01$ の位相空間を示し、右図は $p=0$ のときである。区別されたグレーの領域は異なる流域を意味し、それぞれが安定固定点(大白点)を示す。不安定固定点は流域の境界に存在する(小白点)。黒の曲線は安定固定点と不安定固定点を繋ぐヌルクラインを表す。

2.2 固定点、アトラクタ、流域、分岐

ある力学系がそこに向かって時間発展する、位相空間 $A \subset M$ の不変部分集合 F をアトラクタと呼ぶ。つまりアトラクタに十分に近づいた点は、多少阻害されようともアトラクタに十分近いままであり続ける。同じアトラクタ A で終わるすべての系状態を A の B_A 流域と呼ぶ。図1のように、我々のシステムは $p=-0.01$ の3つの流域を表している。それぞれの流域には固定点アトラクタがある。幾何学的に、アトラクタは点や曲線、多様体、さらには複雑なフラクタル構造であり得るが、本紙の残りでは固定点に注目する。

安定固定点だけがアトラクタであるといえる。不安定固定点は隣接した流域の境界、いわゆる区分線に存在する。これらの固定点は、系状態が区分線に沿ってそれらに引きつけられているという意味では双曲型であるが、それらから安定固定点の方向にはね返される。ヌルクラインの族は安定固定点と不安定固定点を結ぶ。ヌルクラインに沿って

動くことは、常に能動制御を要するのが1次元だけであるため、有利である。

パラメータ p が -0.01 から 0 へゆっくりと変化する場合、区分線とアトラクタは連続して動く。ある値 $p=p_0$ において、1つのアトラクタは突如として完全に消失する。これは分岐と呼ばれ、 p_0 は分岐点という。系が2つ以上のパラメータを持つとき、すべての分岐点はパラメータ空間で複素多様体となりうる。

2.3 ある環境下におけるロボット

それでは既存の概念の説明から、感覚運動ループを備え、特定環境に置かれている具現化されたロボットの説明に移る。研究中の力学系は、ロボットの駆動体だけで構成されるわけではなく、制御ループの内的状態と、ロボットの環境との相互作用も考慮にいれなければならない。図2が示すのは自律ロボットSEMNIである。ロボットが地面に置かれ、内部の制御ループが関節角度を一定に保つ場合、状態ベクトル $\mathbf{x} := (\varphi_h, \varphi_k, \varphi_b)$ はアトラクタに定着する。すなわち安定固定点である。すべての固定点アトラクタは2次元多様体 M を3次元位相空間から切り分ける。ロボットがゆっくり動いている間、例えば $dx/dt \approx 0$ の場合、どの姿勢になるか、どこで分岐が起こるかを我々は言うことができる(例えば x が多様体 M を離れ、他の地点で M を再び得る)。その場合ロボットは転倒し、物理的衝撃を受ける。図3が示すのは、さらに詳細に M を対角線上に切断したものである。破線は分岐が起こる場所を指している。図に示すように、ロボットは姿勢 e で終わるため、ゆっくりした動作を用いるだけでは姿勢 i にはならない。

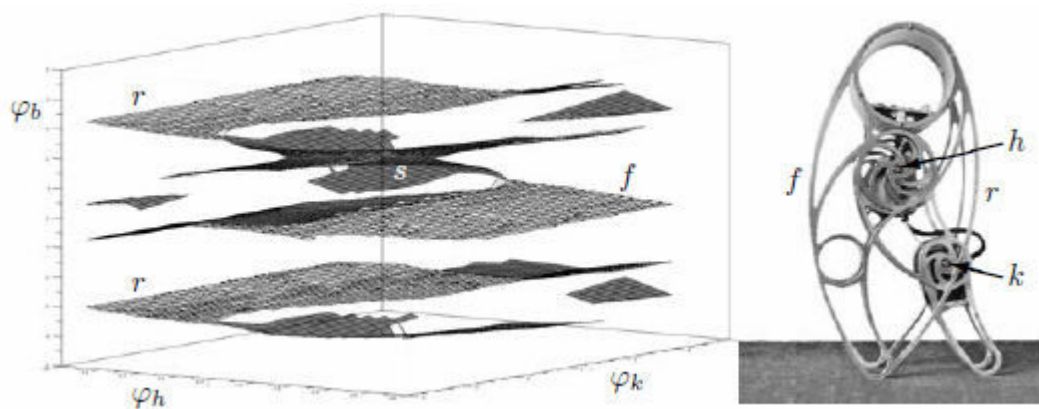


図2 自律ロボットSEMNIは身長30cmで2自由度、すなわち回転関節を股(h)と膝(k)に持つ。体と腰の角度(φ_b)、腰と膝の角度(φ_k)、そしてロボットの体軸と地面の角度(φ_h)、ロボットが地面に置かれているという制約のもとで2次元多様体 $M \subset \mathbb{R}^3$ を定義する。図のように、 M の(s)と表示された部分はロボットの直立状態の姿勢に該当する。前面(f)に寄りかかることと背面(r)に寄りかかることは、同様に認識される。

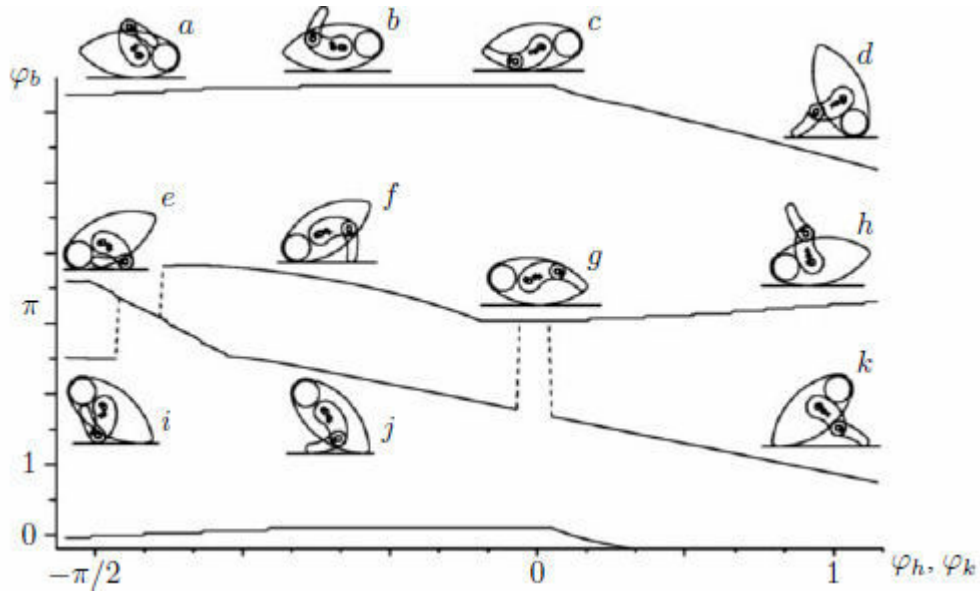


図3 図2の多様体 M を対角線上に切断したもの($\phi_h = \phi_k$)。各胴体形状では、異なる2~3の幾何学的配置が地面に対して共存している。他の(a, e, h, i)がエネルギーを消費しない一方、いくつかの姿勢(d, j, k)は大きな保持トルクを要する。すべての角度が放射状あり、すべて姿勢 c において0になる。

3. アトラクタに基づく行動制御 (ABC)

ロボットの姿勢について触れたので、次に我々は制御された行動について学び、ひとりでに漂うような時でも不安定固定点を積極的に安定させる感覚運動ループを紹介する。これは行動多様性のヌルクラインに沿って移動することを可能にするため、エネルギーを必要な時だけ使いつつ、可能ならいつでもロボットを物理的に働かせることができる。この手法を我々はアトラクタに基づく行動制御(ABC)と呼ぶ。

3.1 エネルギー効率および収縮と開放の原理

生物の最も本質的な仕組みの一つは、収縮と開放の原理である。クラゲの移動からヒトの呼吸まで、すべては収縮振動とその間の開放段階に依存している。力学系においては、収縮は1つの固定点から別の固定点への素早い移行に対応する。それぞれの過渡動作の後、系は次の固定点に保たれるか完全に開放されるか、あるいは安定された状態になるが、常にわずかなエネルギーしか必要としない。

3.2 関節ごとの認知感覚運動ループ(CSL)

有名な中心多様体定理の本旨は、系が受動的な手法で他の次元の後についていく一方、力学系はいくつかの臨界次元の展開によって制御されるということである。自律ロボットにおいて、このことは駆動関節ごとに1つの感覚運動ループを用いることと、これらを収縮状態あるいは開放状態で動かすことを可能にする。図4の左図を参照すると、開放

状態が初期値に頼って系を他の地点に後退させる一方、収縮状態は系を P_3 あるいは P_4 のように上に追いやっている。

最も単純な感覚運動ループでさえ認知能力を持つ。立証された制御構造は図4にあるように、我々がこれから認知感覚運動ループ(CSL)として言及するものである。関節角 φ をインプットとして使い、作動装置の駆動電圧 u をアウトプットする。実際、厳密な角度は必要ない。CSLの左半分は、インプット経路($-g_i$, g_i)と単位遅延(z^{-1})から構成され、入力利得 g_i と微分器を形成する。これは速度信号をCSLに送り、下位の経路(g_i)を除去するために十分である。結果として、CSLを使う時には測定や厳密な感覚値は必要ないといえる。CSLの右半分はパラメータ g 次第で、漏れ積分器や理想積分器、または付加的フィードバックを伴う積分器として機能する。最終的には、 u_0 は固定された身体の緊張を引き起こすために使用できるバイアス運動信号となる。インプットおよびアウトプット値が標準化される場合、 $\varphi, u \in [-1, 1]$ であり、パラメータベクトルは $(g_i, g_f, u_0) \in [0, 2] \times [0, 2] \times [-1, 1]$ の範囲内にあることになる。以下のセクションでは、どのようにCSLが認知的だと見なされるかを見ていく。

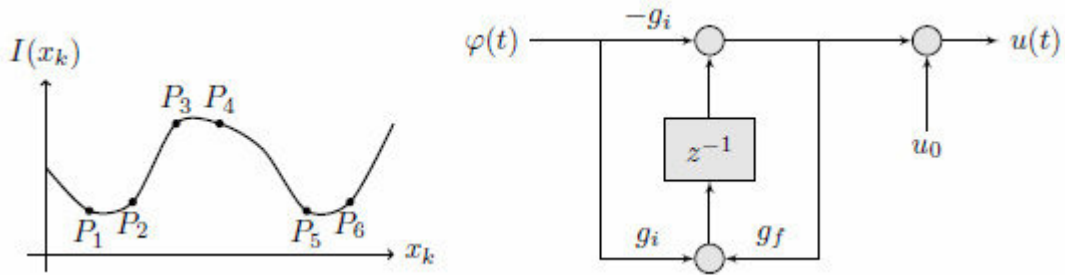


図4 中心多様体定理を考えると、常に1次元のみにおいて変化することにより行動多様性を分析することが出来る。左図は位相空間の任意成分 x_k に沿った一般的な状況を示す。制御されていない系においては、 $\Delta x_k = -dl/dx_k$ に従って展開される。地点 $P_1 \dots P_6$ にとどまるのに多くのエネルギーを消費することはない。収縮と開放の原理は常に次のそのような地点へと導く。右図は、必要な制御パラダイムを3次元パラメータベクトル (g_i, g_f, u_0) の機能として有効にする認知感覚運動ループ(CSL)を表す。

3.3 アトラクタに基づく行動制御はどのように1本足での起立を可能にするか

ABCの力を明らかにするため、我々は図5のように、モジュール型ヒューマノイドロボットMYONを用いた実験を行った。足は3駆動自由度、つまり、腰、膝、足首に回転関節を持っている。各関節はそれぞれ局所的にCSLを備えている。我々は同じパラメータベクトル $(g_i, g_f, u_0) = \mathbf{v}_c$ を3つのCSLで使用した。ここでは $\mathbf{v}_c := (0.9, 1.1, 0.0)$ である。これは収縮性のCSLであり、前セクションで抽象的に説明された行動である。ロボットの足では複雑な行動連鎖が図5のように生ずる。まず、足首、膝、そして大部分が地面と接触し、それから腰は重量を経験して収縮を始める(1-2)。これにより膝は地面から持ち上がり、膝もまた収縮を始める(3)。ある時点で足はつま先とかかとの上に傾き、全体は宙にあることになる(4)。これが膝関節を回転方向に向けさせ、重力に逆らって動くようになる(5)。他の関節は等しく力と均衡しているため、足は完全に直立位置になり(6-7)、あらゆる外部擾乱に抵抗する。

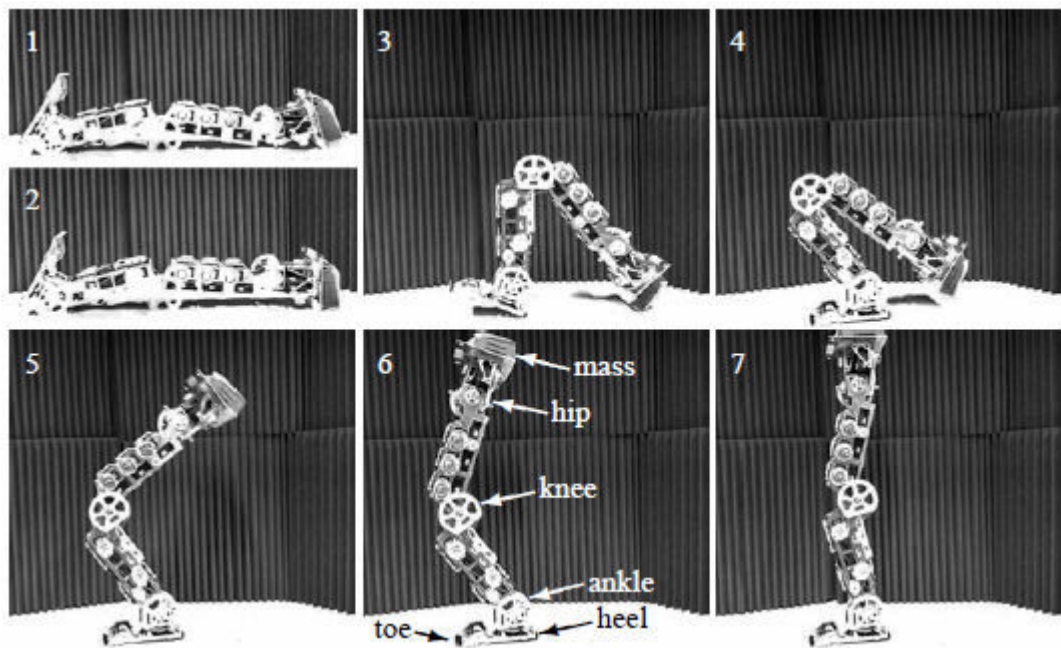


図5 このロボットMYONの1本の足は、提示されたABCパラダイムを用いて立ち上がることが可能である。3つの関節はそれぞれ収縮性CSL(v_c)によって局所的に制御される。3つの関節速度以外に感覚データは必要なく、実際は厳密な角度も必要でないので、センサ校正はABCによって動くロボットにとっては時代遅れのものである。さらに、関節間でのやりとりはない。この複雑な起立行動はもっぱらCSL、足の機械的性質、地面、そして重力の相互作用によって生じる。一度立てば、たとえ地面が傾いたり、外部から力がなかったり、足の上の質量分布が変わっても、足は直立位置を維持する。

4. ABC学習による感覚運動多様性の分析

ロボットの1本足起立動作は、複雑な行動連鎖である。別の時点で、関節は動き始め、再び速度を落とし、あるいはそれらの回転方向を変えすらする。異なる動作エピソードが起こるが、ナイーブな観察者には、これは意図的に選択された行動連鎖のように見えるだろう。ほとんどの既存ロボットがこれに当てはまる。しかし、まるで正反対のことがここでは真実なのである。内在するABC機構はそのような概念、例えば行動や行動選択といったものを持たないのである。我々はさらに一歩進んで、収縮と開放の両状態の積極的な切り替えがどこでなされるのかを見ていく。

4.1 退屈と痛み：不快な状態の認識

我々はまず、いつ、どのような理由でCSL状態の切り替えをするか決めなければならない。すぐに思い浮かぶ3つの状況がある。1つ目はロボットが定常状態にあり、わずかな動き以外何も起こらない時で、ロボットは何か新しいものを分析しようとするはずである。これはすべてのCSLの内部状態がしばらくの間ほぼ0であることを確認することで簡単に分かる。2つ目は、ロボットが収縮状態の間に自身に触れる時で、CSLはすべて

の限界を超えてアウトプット信号を増やすようになる。もし何の防衛手段も開始されなければ動力装置の熱が上昇し焼け焦げる可能性があるため、これはロボットにとって有害である。幸いこの失速状態は、少なくとも1つのCSLが境界線を越えて増大しているかを確認することで簡単に見つけられる。もし電流測定が感覚インプットとして得られるなら、それらを監視することは失速探知のより適した方法になるだろう。3つ目は、すでに図3で見たように、ロボットが多様体から離れる分岐は存在するが、ロボットが起こそうとするどんな慎重な動作も助けにはならない。この状況に対する応急処置はない。なぜなら常にロボットの体には最初に物理衝撃があるからである。確かに、成熟したABC学習は次回また同じ状況になることを防ぐため、そのような出来事に対する記憶処理を含んでいるが、ここでは我々は初めの2つの状況だけを扱っていく。1つの状態が満たされればトリガー信号が発生するだろう。

4.2 収縮および開放状態のCSLの切り替え

すでに説明したように、我々はCSLの状態を次々に変えることで感覚運動多様性を分析できる。従って、我々は1つの次元のみに制限し、収縮状態のCSLを用いて、系が安定化した固定点に置かれていることを前提とする。図4を参照し、我々は P_3 と P_4 の間どこかにいるとする。次の安定固定点に到達するために進む方向は2つある。 P_2 と P_5 である。類似の状態は、例えば P_1 と P_2 の間にいる時も起こりうる。よって、我々が2つのCSL状態、収縮と開放しか持たないのかどうかは不明瞭である。我々はどうにかして対称性、または制御を支配する環境からのランダム力を積極的に壊さなければならない。最も単純なやり方は、1つではなく2つのわずかな反対バイアス開放状態を使うことである。続いて説明する実験では、以下のCSL状態を用いた(パラメータベクトルによって十分に定義されている)。以前定義されたように、 $\mathbf{v}_r^+ := (0.0, 0.0, 0.1)$ 、 $\mathbf{v}_r^- := (0.0, 0.0, -0.1)$ 、そして $\mathbf{v}_c := (0.9, 1.1, 0.0)$ である。図6の左図のように、一定のCSL状態(ここでは $\{\mathbf{v}_r^+, \mathbf{v}_r^-, \mathbf{v}_c\}$)では、我々は一定方向に依存したCSLの状態切り替えを命令する有限状態機械を定義することが出来る。トリガー信号が発生する度、我々は無作為にCSLの1つとランダム方向(+か-)を選び、有限状態機械によって選ばれたCSLのパラメータベクトルを更新する。ただランダム決定を使うよりもはるかに賢い機構がABC学習にはあるが、ランダム決定はすでに短時間の単純ロボットの感覚運動多様性を完全に分析するのに十分なので、それ以上詳しくは見ない。

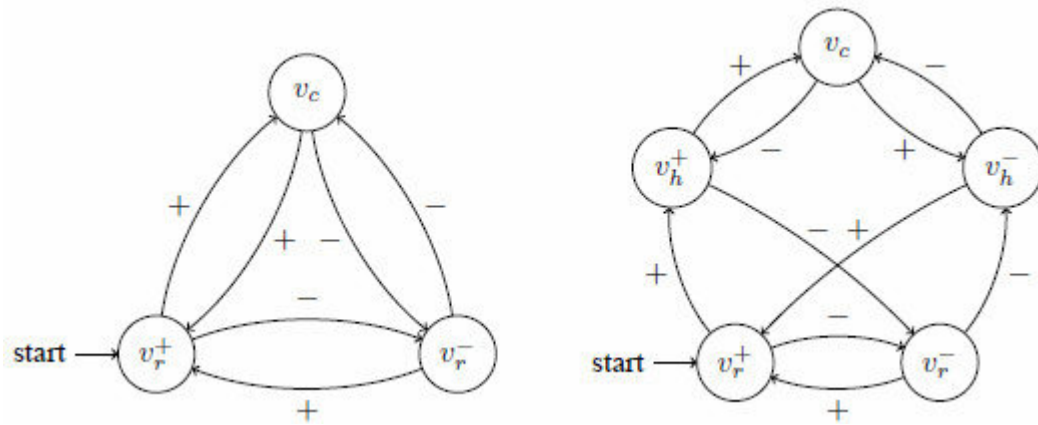


図6 ABC学習で使われる2つの有限状態機械。ヌルクラインの性質によって、モーター次元ごとに現在の固定点から離れるための方向は2つ(+か-)しかない。一定のCSL状態では、状態機械はそれらが同じ方向に移動し続けるために、どのような順で切り替えられたらいいか定義する。左の状態機械が最小である。それぞれの状態は系を固定点に導く。右の状態機械は左のものを拡張したもので、最大エネルギー消費(v_r^+ と v_r^-)での2つの付加的状态が含まれる。それらは常に安定固定点と不安定固定点の間にある。

4.3 ロボットの感覚運動多様性の自己分析

図2と図3で見たように、ロボットSEMNIの感覚運動多様性を検証したデータを携え、我々は実ロボットに、前述したCSL、3つの最小のCSL状態 $\{v_r^+, v_r^-, v_c\}$ 、対応する有限状態機械(図6の左を参照)、状態維持および失速状態における認知機構、ランダム決定経験則を用いてABC学習をテストした。ABC学習は、姿勢c、つまり前面に横たわる状態で地面に置かれたロボットとともにゼロから始まる(図3)。10分間の動作後の結果は図7である。考えられる低エネルギー姿勢の90%以上(30/33)が、ABC学習によって発見された。これはアルゴリズムがコンピュータ的に単純で決定経験則に関して最適化がされていない範囲で、素晴らしいものである。微調整が必要なパラメータがないことに注意したい。CSL状態ベクトルの正確な値は重大ではない。同じ値が30cmの軽量ロボットと125cmのヒューマノイドロボットに一樣に使われる。発見された姿勢に加えてアルゴリズムはまた、色々な姿勢を取るために最適な(エネルギー効率の点で)運動挙動の有向グラフを作る。現在の吸引流域が強制的に離されない限り、すべての姿勢と運動挙動が地面との摩擦、機械的摩耗、環境外乱に対して不変的あることを我々は最後に思い浮かべるのだ。

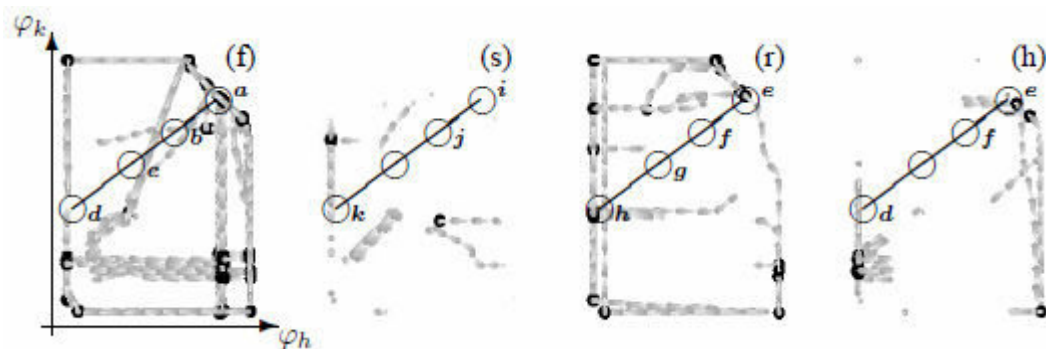


図7 ロボットSEMNIのABC学習の結果。黒点は姿勢を示し、灰白線は間の過渡動作を示している。姿勢と軌跡は、図2で示される2次元多様体 M の中にある。 M は \mathbb{R}^3 に内蔵されており、地面に対するロボットの幾何学的配置に対応する第3の次元 ϕb に4分割されている。(f), (s), (r), そして (h)はそれぞれロボットが前に横たわる時、直立する時、背面に横たわる時、倒立のような姿勢を取る時の幾何学的配置を示している。4つの文字は図2のものに対応している。図3で示した M を対角線上に切ったものは、ここでは黒線として表されている。ラベル付きの円は同じ胴体形状と姿勢を識別する。以上のように、すべてのエネルギー効率の良い姿勢(a, e, h)はABC学習によって発見された。我々は股関節と膝関節にそれぞれ1つずつ、そして図6の有限状態機械にCSLを用いた。すでに指摘されたように、姿勢 h は達成されないため発見できない。 M の示されている部分は最初の10分間にゼロから分析されたもので、ほとんどすべての既存の姿勢をすでに含んでいる。

5. 考察と展望

要約すると、我々はロボットの感覚運動多様性の自己分析における新たな枠組みを提示した。それはABC学習と呼ばれ、いくつかの要素から構成されている。本質的な部分は、我々がアトラクタに基づく行動制御として定義したもの、すなわち環境的影響力を間接的に見つける、またはそれに従ったり、反抗したりする認知能力を示す局所的な感覚運動制御ループである。それらCSLと呼ばれるものは、コンピュータ的に費用がかからず、絶対的または校正された感覚入力データは必要ない。異なる操作モードは3次元パラメータベクトルを用いて設定されるが、その値も不正確で構わない。我々は独立型CSLにおける強固で効果的な操作の実験的証拠や、別のロボットのプラットフォームにおける全体の枠組みを提示した。ABC学習の質は検証されたデータを基準に評価される。基本的なABC学習の枠組みは、すべての機械的摩擦や環境外乱に対する固有のロバスト性といった長所、以前のパラメータを微調整することなしにゼロから始められる能力、姿勢や運動挙動を低密度で意味を考慮したコーディングをする能力を示している。興味深いことに、人々はABC学習で発見された姿勢にすぐに動詞の名前を与えていて、例えば、横たわる、座る、立っている、膝をついている、指を立てている、といったものであるが、もし我々が座っているという動詞があらゆる種類の「座っている状態」、足を地面について椅子の上にいる状態、足をぶらぶらさせてテーブルの上にいる状態、を表していることに気がつくならそれはもっともらしく見えるが、膝や足首が自由に動ける一方(開放状態)、実際に直立を保っている(収縮状態)のは腰や首なのである。CSLによって制御された、ロボットの起立する足を人のそばに置いて地面を傾ける場合に、このような例示の有効性はより明確になるだろう。

将来の研究では、より多くの関節をもったロボットに焦点が置かれることになる。考える運動挙動の数は関節の数とともに直線的に増えていくため、我々は次元の呪いがABC学習によって解けると信じている。同時に、さらなる動的運動を可能にする付加的CSLについて研究していくつもりである。

謝辞

本研究の一部はEuropean research project ALEAR(FP7, ICT-214856)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] W.R.アシュビー (1960) 『脳のデザイン』 J. ワイレー社,
- [2] W.パワーズ(1973) 『行動：知覚制御』 アルドゥス・トランザクション社
- [3] J.M. ハーマン、M.ホリッチ、R.デル (2004) 『アシュビーのホメオスタットから:適応性調節の公式モデル』 「動物から有生へ」 pp.324-333. MITプレス社
- [4] R.A.ピーターズ、O.C.ジェンキンス (2005) 『ロボノアの感覚データ状態空間での多様体構造』 ヒューマノイドロボットIEEE-RAS国際会議での議事録
- [5] R.デル、F.ヘッセ、G.マーティアス (2005) 『力学系的アプローチから人口生物へのロッキング・スタンパーとジャンピング・スネーク』 「適応行動 vol.14」 pp.116
- [6] P.-Y.オーディエル、A.バレーンズ (2008) 『本質的モーターベースと開発の能動的学習』 「ロボットにおけるモーターから相互学習へ」 IROS2008ワークショップ、ニース、フランス
- [7] M.トゥーサン(2006.5) 『感覚運動マップ：予知と計画のための側方相互の制御』 「ニューラル・コンピューテーション vol.18」 pp.1132-1155
- [8] M.ガーランド、Y.チョウ (2005.4) 『二次に基づくあらゆる次元の単純化』 「ACMトランザクション・グラフ vol.24」 pp.209-239
- [9] S.フィオーリ(2008.12) 『多様体退縮によるリー群型の神経系学習』 「ニューラル・ネットワーク vol.21」 pp.1524-1529
- [10] H.ホフマン、G.ペトコス(2007) 『継続的に変化する文脈下におけるセンサ補助適応運動制御』 制御、自動化、ロボット工学の国際会議(ICNCO 2007年)、アンジェ、フランス
- [11] A.シュナイダー(2006) 『閉鎖運動連鎖における弾性接合の移動制御のための局部的速度正帰還：2DoFアーム、3DoF昆虫のモデリングシミュレーション研究』 ビーレフェルト大学生物学部卒業論文
- [12] R.R.セルミック、F.L. ルイス(1999) 『神経系回路における動的反転の非線形系バックラッシュ補償』 「ニューラル・ネットワーク」 pp.76-87
- [13] Q.H.シア、Y.リン、M.H.A.ジュニア、T.M.リン(2004) 『モデルに基づく作動空間速度観察を用いた適応関節摩擦補償』 「ロボット工学と自動化に関するIEEE国際会議 vol.3」 pp.3081-3086
- [14] M.ガッシャー、T.マルティネス(2010) 『推定された状態系列を力学系モデルに用いる』 「ジャーナル・オブ・マシーン・ラーニング・リサーチ1」
- [15] S.フィオーリ(2006) 『状態空間形式による安定した離散時間IIRフィルタのブラインド適応』 「IEEEトランザクション・オン・シグナル・プロセッシング」 pp.2596-2605
- [16] M.ヒルド(2007) 『自律歩行ロボットの運動操作のための神経力学モジュール』 ベルリン・フンボルト大学第2理学部数学科卒業論文
- [17] M.ヒルド、M.クビッシュ、D.ゴーリング(2007年9月) 『補間されたキーフレームから神経アトラクタランドスケープをどのように得るか、またその理由について』 移動ロボットについての第3回西欧会議議事録、フライブルグ、ドイツ

- [18] M.ヒルド、F.ペースマン(2007)『柔軟性な歩行パターン生成のための自動調節リングモジュール(SARMs)』第20回 人口知能についての国際合同会議議事録、pp.848-852
- [19] S.ホーフアー、M.ヒルド(2010.10)『ヒューマノイドロボットの感覚運動歩行パターンの反応性改善に用いる低速で変化する特徴分析』コンピュータ・インテリジェンスについての第2回国際合同会議議事録、バレンシア、スペイン
- [20] S.ホーフアー、M.ヒルド、M.クビッシュ(2010.11)『ヒューマノイドロボットの姿勢を表現する行動多様性の抽出に用いる低速で変化する特徴分析』エビジェネティック・ロボティクスについての第10回国際会議議事録、オレナスロット、スウェーデン
- [21] M.クビッシュ、M.ヒルド、S.ホーフアー(2010.11)『感覚運動状態空間分析のための内的動機付けシステムの提案』エビジェネティック・ロボティクスについての第10回国際会議議事録、オレナスロット、スウェーデン